

Yield of spring barley in conditions of sulphur fertilization

Plonowanie jęczmienia jarego w warunkach nawożenia siarką

Bożena BARCZAK¹ (✉), Wasyl ŁOPUSZNIAK², Małgorzata MOSKAL¹

¹ Department of Agriculture Chemistry, Faculty of Agriculture and Biotechnology, University of Science and Technology, Bydgoszcz, Poland

² Department of Agricultural Chemistry and Soil Science, Faculty of Agrotechnologies and Ecology, Lviv National Agrarian University, Lviv, Ukraine

✉ Corresponding author: barczak@utp.edu.pl

ABSTRACT

In the last 20 years, due to a significant reduction in industrial emissions and changes in the assortment of available fertilizers, a progressive sulphur deficiency has been observed in the soils of Poland and other parts of the world. This creates the need to supplement NPK fertilizers with sulphur and to conduct research on the optimization of its use as a fertilizer component. A three-year field study was carried out on Haplic Luvisols with low content of sulphur available to plants. The aim of the study was to assess the effect of sulphur-containing fertilizers (ammonium sulphate, potassium sulphate and Wigor S) applied at rates of 20 and 40 kg S/ha on the yield of grain, straw and protein of spring barley. The study showed that application of sulphur, irrespective of its form, generally significantly increased the yield of spring barley grain and straw as compared to the control. However, no significant differences were found in the effects of the fertilizers on yield depending on either the fertilizer type or application rate. Protein content in the grain of the plants fertilized with sulphate sulphur was on average about 6% higher than in the grain of non-fertilized plants. As a result of the beneficial effect of sulphur on the yield of spring barley grain and on its protein content, the protein yield increased. The highest increases were obtained following application of sulphate fertilizers, especially at a 40 kg S/ha. The research suggests that irrespective of the form used, sulphur fertilization in the conditions of deficiency of this nutrient in the soil, with relatively high temperatures and high soil moisture, significantly affects the yield of spring barley grain and straw and the accumulation of protein in the grain.

Keywords: fodder barley, protein, sulphur-containing fertilizers, yield of grain, yield of protein, yield of straw

STRESZCZENIE

W ostatnim 20-leciu w wyniku znaczącego ograniczenia emisji przemysłowych oraz zmiany asortymentu nawozów, obserwuje się postępujący niedobór siarki w glebach w Polsce, a także w innych regionach świata. W tej sytuacji istnieje konieczność suplementowania nawozów NPK siarką oraz prowadzenia badań nad optymalizacją jej stosowania jako składnika nawozowego. Przeprowadzono trzyletnie badania polowe na glebie płowej właściwej o niskiej zasobności w dostępną dla roślin formę tego składnika. Ich celem była ocena wpływu nawozów zawierających siarkę (siarczanu amonu, siarczanu potasu i Wigoru S) stosowanych w dawkach 20 i 40 kg S/ha na wielkość plonu ziarna, słomy i białka z ziarnem jęczmienia jarego. Badania wykazały, że zastosowanie siarki, niezależnie od jej formy, na ogół istotnie podwyższało w porównaniu z kontrolą, wielkość plonu ziarna i słomy jęczmienia jarego. Nie stwierdzono jednak istotnych różnic pomiędzy plonotwórczym działaniem badanych nawozów w zależności od ich typu, ani dawek. W każdym z lat badań najwyższą efektywność rolniczą siarki uzyskano po zastosowaniu siarczanu potasu, niższą – po aplikacji pozostałych

badanych nawozów. Zastosowanie wyższej dawki siarki (40 kg/ha S) obniżało wartości badanego wskaźnika w porównaniu z dawką niższą (20 kg/ha S). W ziarnie roślin nawożonych siarką siarczanową w porównaniu z ziarnem roślin nienawożonych wykazano wyższą zawartość białka, średnio o około 6%. W wyniku korzystnego oddziaływania siarki na wielkość plonu ziarna jęczmienia jarego oraz na zawartość w nim białka, nastąpiło zwiększenie jego plonu. Najwyższe przyrosty uzyskano po aplikacji nawozów siarczanowych, zwłaszcza w dawce 40 kg S/ha. Przeprowadzone badania pozwalają sądzić, że nawożenie siarką w warunkach niedoboru tego składnika w glebie, przy utrzymujących się stosunkowo wysokich temperaturach i dużym uwilgotnieniu gleby, bez względu na zastosowaną jej formę, wpływa znacząco na wielkość plonu ziarna i słomy jęczmienia jarego oraz na kumulację w nim białka.

Słowa kluczowe: białko, jęczmień pastewny, nawozy siarkowe, plon białka, plon słomy, plon ziarna

DETAILED ABSTRACT

Over the past two decades, there has been a systematic decline in SO₂ emissions from anthropogenic sources in Poland, which in conjunction with uptake of sulphates by plants and the fact that they are easily leached from the light soils that dominate the country, has led to a deficiency of sulphur in Polish soils. The average deposition of this element in recent years has been estimated at 12–14 kg/ha. Monitoring of arable soils in Poland in 2015 showed that 91.7% of the 216 analysed soil profiles in the entire country had low content of sulphate sulphur. The problem of sulphur deficiency has a global dimension, affecting many other regions of the world, and the use of fertilizers containing this nutrient has become an important element of sustainable agriculture. Optimization of sulphur fertilization, in addition to establishing the most suitable application rates in given soil and climatic conditions and for a given species, also requires the selection of the appropriate form of fertilizer, method of application, and time of application. This is important for both economic and ecological reasons.

In view of the progressive deficiency of sulphur available for plants in the soils and its very important physiological role, a study was conducted to assess the effect of fertilizers containing various forms of this nutrient on the yield of spring barley seeds and straw, as well as on the content and yield of protein in the grain. The research was based on a single-factor field experiment carried out in 2010–2012 in northern Poland (the village of Wierzchucinek near Bydgoszcz, 53°26' N, 17°79' E). It was conducted on slightly acidic Haplic Luvisols with low sulphur content. The 'Antek' fodder cultivar of spring barley was grown. The forecrop each year was potato. The experimental factor was the type of mineral fertilizers, containing sulphur in ionic form (potassium sulphate and ammonium sulphate) and elemental form (Wigor S containing 90% elemental sulphur and 10% bentonite). Each fertilizer was applied at rates of 20 and 40 kg S/ha. A treatment without sulphur was included as well. In spring, uniform NPK fertilization was applied before sowing in all treatments. The rainfall and temperatures during the growing seasons in which the experiment was conducted were relatively high, generally higher than the corresponding long-term averages, as confirmed by high Selyaninov coefficients.

The fertilizers tested generally significantly increased the yield of spring barley grain and straw in comparison to the control. However, there were no significant differences in their effect on yield depending on either the fertilizer type or application rate (20 and 40 kg S/ha). The barley grain from all sulphur fertilization treatments had higher protein content than grain from the control, but significant differences were noted only for the sulphate fertilizers – ammonium sulphate and potassium sulphate. In general, no significant differences were found between the effects of individual fertilizers or their application rates on the protein content in the grain.

The agronomic use efficiency of sulphur, which is a measure of its effect on the yield of spring wheat, varied substantially between years of the study. In each year the efficiency of sulphur was highest when potassium sulphate was applied, and much lower following application of the other fertilizers tested. The higher sulphur application rate (40 kg/ha S) resulted in a reduction in this indicator as compared to the lower rate of application (20 kg/ha S).

The highest protein yields, calculated as the product of grain yield and the protein content in the grain, were obtained in 2010. As a result of the beneficial effect of sulphur on the yield of spring barley grain and its protein content, its yield increased. The greatest increases in protein yield in the grain were obtained after application of sulphate fertilizers, especially at a rate of 40 kg S/ha. Application of 40 kg S/ha, irrespective of the type of fertilizer, generally resulted in

higher protein yields than in the case of 20 kg S/ha, but the differences were generally not statistically confirmed.

The results of the research indicate that sulphur fertilization of spring barley grown in conditions of deficiency of this nutrient in the soil and relatively high temperatures and high soil moisture, regardless of the form used, has a pronounced effect on grain and straw yield and on the accumulation of protein in the grain.

WSTĘP

W Polsce jęczmień jary należy do podstawowych gatunków zbóż. Zbiory ziarna tego gatunku w latach 2011-2015 wynosiły średnio 2062,2 tys. ton (Wyniki produkcji roślinnej, Główny Urząd Statystyczny – GUS, 2017). Udział jęczmienia w strukturze zbiorów zbóż stanowił 11,5%. Jęczmień jest zbożem o wszechstronnym zastosowaniu. W naszym kraju jego ziarno jest wykorzystywane głównie na cele paszowe (67–70% zbiorów), zarówno do sporządzania mieszanek treściwych bezpośrednio w gospodarstwach, jak i w przemyśle paszowym. Ponadto, może być również przeznaczany na cele browarnicze (produkcja siodu) i spożywcze (produkcja kasz i płatków) (Metodyka integrowanej ochrony..., 2012).

Jednym z najważniejszych czynników determinujących wydajność zbóż jest nawożenie mineralne, w szczególności stosowanie azotu. Nie jest jednak możliwy prawidłowy metabolizm azotu w roślinie bez właściwego jej zaopatrzenia w siarkę, która pełni specyficzne funkcje fizjologiczne. Wiele badań (Lośak i in., 2000; Ahmad i in., 2007; Jamal i in., 2010; Podleśna, 2013; Barczak i in., 2016) potwierdza, że wykorzystanie azotu z nawozów oraz jego efektywność jest wyższa w warunkach optymalnego zaopatrzenia roślin w siarkę. W ostatnim 20-leciu w wyniku znaczącego ograniczenia emisji SO_2 ze źródeł antropogenicznych oraz zmiany asortymentu nawozów, obserwuje się niedobór tego składnika w polskich glebach. W 1980 r. emisja SO_2 w Polsce wynosiła około 130 kg/ha, a w połowie lat 90. ubiegłego wieku obniżyła się do 33 kg S/ha (Szulc, 2008). W ostatnich latach - w zależności od regionu - depozycja tego składnika waha się od 13,3 (województwo lubelskie i podlaskie) do 23,6 kg S/ha (śląskie) (Klikocka i in., 2015). Konsekwencją tego stanu rzeczy są wyniki badań wykonanych w ramach monitoringu chemizmu gleb ornych w Polsce (Siebielec i in., 2017), z których wynika, że 91,4% z 216 pobieranych z

różnych regionów kraju profili glebowych charakteryzuje się niską zawartością siarki siarczanowej. Zjawisko niedoboru siarki w glebach ma wymiar globalny. Podobne tendencje odnotowano również m.in. w większości krajów europejskich (Morris, 2007; Mathot i in., 2008), w centralnej Turcji (Inal i in., 2003), we wschodniej części USA (Jeschke i Diedrick, 2012), w zachodniej części Kanady (Janzen i Bettany, 1984), w Brazylii (Lucheta i Lambais, 2012), w krajach Ameryki Środkowej (Raun i Baretto, 1992). Nawet w Chinach, które w minionych dekadach były największym emitentem SO_2 w skali światowej, dzięki skutecznemu odsiarczaniu spalin, od roku 2005 zanieczyszczenie środowiska siarką systematycznie obniża się (Lu i in., 2010). Wysoki poziom emisji ditlenku siarki utrzymuje się jedynie w Indiach, w których ze względu na dynamicznie rozwijającą się gospodarkę ma miejsce wciąż gwałtowny wzrost zużycia energii, głównie ze źródeł konwencjonalnych (Li i in., 2017).

Pogłębiający się w ostatnich latach niedobór siarki w polskich glebach (Przygocka-Cyna i Grzebisz, 2017; Siebielec i in., 2017), spowodował wzrost zainteresowania tym pierwiastkiem jako składnikiem nawozowym niezbędnym w produkcji roślinnej, również w agrotechnice zbóż (Barczak, 2010; Filipek-Mazur i in., 2013; Podleśna, 2013). Stanowiło to przesłankę dla podjęcia badań, których celem była ocena wpływu nawożenia siarką, zastosowaną w różnych dawkach i formach, na plonowanie jęczmienia jarego. Dodatkowym aspektem badań była ocena efektywności rolniczej tego składnika nawozowego.

MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Charakterystyka doświadczenia polowego

Trzyletnie (2010-2012) badania polowe przeprowadzono w miejscowości Wierzchucinek koło Bydgoszczy (53°26' N, 17°79' E) położonej w północnej

części Polski. Doświadczenie zlokalizowano na lekko kwaśnej glebie (pH_{KCl} 5,3) płowej typowej (wg WRB – *Luvisols*) o średniej zasobności w przyswajalne formy fosforu (69,4 mg/kg), potasu (203,5 mg/kg) i magnezu (50,1 mg/kg) oraz niskiej – w siarkę (12,3 mg/kg). Doświadczenie polowe założono metodą losowanych bloków jako jednoczynnikowe, w trzech powtórzeniach. Powierzchnia poletka wynosiła 20 m² (4 m x 5 m), a do zbioru – 16 m². Co roku po ziemniaku uprawiano pastewną odmianę jęczmień jarego – Antek. Czynnikiem doświadczenia był rodzaj nawozów mineralnych zawierających siarkę w postaci jonowej (siarczan amonu – S_1 i S_2) i siarczan potasu – S_3 i S_4) oraz elementarnej (Wigor S – S_5 i S_6), zawierający 90% siarki elementarnej i 10% bentonitu. Wyodrębniono też obiekt kontrolny (S_0) bez nawożenia siarką. Zabiegi agrotechniczne i nawożenie zostały przeprowadzone zgodnie z zaleceniami dla jęczmienia jarego (Korbas i Mrówczyński, 2012). Wiosną na wszystkich obiektach zastosowano przedsięwzięcie nawozy NPK: w formie saletry amonowej (80 kg/ha N), superfosfatu potrójnego (20 kg/ha P) i 50% soli potasowej (70 kg/ha K). Na obiektach z siarczanem amonu (S_1 i S_2) oraz z siarczanem potasu (S_3 i S_4) odpowiednio obniżono dawki saletry amonowej i soli potasowej, uwzględniając azot i potas wnoszone z nawozami siarczanowymi.

Bezpośrednio po zbiorze roślin określono wielkość plonu ziarna i słomy jęczmienia jarego. Na podstawie wielkości plonu ziarna wyliczono współczynnik efektywności rolniczej siarki (ES) obliczono według wzoru:

$$E_s = (\text{Pl}_s - \text{Pl}_0) / S * 100\%,$$

gdzie:

Pl_s – plon ziarna jęczmienia jarego w obiekcie nawożonym siarką,

Pl_0 – plon nasion jęczmienia jarego w obiekcie kontrolnym,

S – dawka siarki.

Badania chemiczne

W próbkach zbiorczych materiału glebowego pobranych przed założeniem doświadczenia polowego oznaczono zawartość przyswajalnych form fosforu i potasu metodą Egnera-Riehma oraz magnezu – metodą Schachtschabela. Do oznaczenia zawartości siarki siarczanowej zastosowano metodą nefelometryczną, po ekstrakcji gleby roztworem octanu amonu z kwasem octowym.

W nasionach oznaczono zawartość azotu ogólnego metodą Kjeldahla za pomocą aparatu Foss Tecator Kjeltec 8200 i obliczono zawartość białka ($6,25 * N_{\text{ogólny}}$) i jego plon.

Warunki pogodowe badań

W celu pełniejszej charakterystyki warunków pogodowych podczas prowadzenia doświadczenia polowego obliczono wartości hydrotermicznego współczynnika Selianinowa:

$$P/0,1 * \Sigma t, \text{ gdzie:}$$

P – miesięczna suma opadów atmosferycznych (mm),

Σt – miesięczna suma dobowych temperatur powietrza > 0 °C

W sezonie wegetacyjnym 2010 r. wartość współczynnika wynosiła średnio 1,61 (Tabela 1), co wskazywało na warunki dość wilgotne. Dla lat 2011 i 2012 jego wartości były zbliżone i wynosiły średnio: 1,44 i 1,54, co odpowiadało warunkom optymalnym. W porównaniu ze średnią wieloletnią (1949-2012) we wszystkich latach (z wyjątkiem maja 2010 roku) sumy opadów w miesiącach od maja do sierpnia były wyraźnie wyższe. Zwłaszcza maj, czerwiec i lipiec roku 2012 wyróżniały się wysokimi opadami atmosferycznymi, co potwierdzają wysokie wartości współczynnika Sielianinowa dla tego okresu. Opady znacznie wyższe niż w wieloleciu odnotowano również w czerwcu i lipcu roku 2010 oraz w maju i w czerwcu roku 2011. Temperatury powietrza od maja do sierpnia włącznie we wszystkich latach badań, z wyjątkiem czerwca 2010 roku, były wyższe od średniej wieloletniej.

Table 1. Temperature and precipitation distribution throughout the field experiment**Tabela 1.** Temperatura i opady w okresie prowadzenia doświadczenia polowego

Years / Lata	Months / Miesiąc					
	IV	V	VI	VII	VIII	
Mean daily air temperature / Średnia temperatura powietrza (°C)						Mean / Średnia
2010	7	13,1	14,3	19,3	18,6	14,5
2011	7,5	15,7	16,4	18,9	19,9	15,7
2012	6,4	14,4	17,6	19,2	18,4	15,2
Mean / Średnia (1949-2012)	8	13	16,3	18,5	17,8	14,7
Sum of monthly precipitation / Suma miesięcznych opadów (mm)						Sum / Suma
2010	42,4	34,9	80,5	146,1	49,7	353,6
2011	17,7	111,5	91,3	77,9	58	356,4
2012	18,5	118,1	100,4	110,6	17,7	365,3
Mean / Średnia (1949-2012)	27,2	43,9	54,4	72,9	55,8	254,2
Sielianinov's coefficient / Współczynnik Sielianinova						Mean / Średnia
2010	2,02	0,86	1,88	2,44	0,86	1,61
2011	0,79	2,29	1,86	1,33	0,94	1,44
2012	0,96	2,65	1,9	1,86	0,31	1,54
Mean / Średnia (1949-2012)	1,22	1,01	1,15	1,26	0,95	1,18

ANALIZA STATYSTYCZNA

Uzyskane wyniki badań zostały poddane analizie wariancji (ANOVA) w układzie zależnym według modelu zgodnego ze schematem doświadczenia jednoczynnikowego. Do oszacowania istotności różnic średnich obiektowych zastosowano test rozstępu Tukeya z prawdopodobieństwem $P \leq 0,05$.

Wyniki i dyskusja

Najniższy średni dla wszystkich objętych badaniami obiektów plon ziarna (3,97 t/ha) i słomy jęczmienia jarego (4,18 t/ha), uzyskano w 2010 roku (Tabela 2), w którym po suchym maju nastąpił chłodny czerwiec (Tabela 1). Warunki takie nie sprzyjały formowaniu i dojrzewaniu

ziarna jęczmienia. W sezonach wegetacyjnych 2011 i 2012 rozkład opadów i temperatur był bardziej korzystny dla plonowania tego gatunku, a plony ziarna w tych latach wynosiły odpowiednio 4,63 i 4,21 t/ha. Warto podkreślić, że średnia wielkość plonów ziarna jęczmienia uzyskanych w przeprowadzonych badaniach polowych była znacząco wyższa od plonów ziarna tego gatunku uzyskanych w Polsce w latach 2011-2015, które wynoszą 31,3-38,2 t/ha (Wyniki produkcji roślinnej, GUS 2017).

Pomimo, że jęczmień jary jest zaliczany do gatunków o niewielkich wymaganiach pokarmowych w stosunku do siarki, stwierdzono wyraźną reakcję plonu na nawożenie tym składnikiem (Tabela 2). Badania wykazały, że zastosowanie siarki na ogół istotnie podwyższało plon

Table 2. The yield of spring barley and agronomic use efficiency of sulphur**Tabela 2.** Plon ziarna i słomy jęczmienia jarego oraz efektywność rolnicza siarki

	Control/ Kontrola	Type of fertilizer / Rodzaj nawozu						
		(NH ₄) ₂ SO ₄		K ₂ SO ₄		Wigor S		Mean / Średnio
Years / Lata		Dose of sulphur/Dawka siarki (kg/ha S)						
	0	20	40	20	40	20	40	
	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	
The yield of grain / Plon ziarna (t/ha)								
2010	3,77	3,94	4,08	4,02	4,05	3,86	4,07	3,97
2011	4,26	4,57	4,79	4,64	4,79	4,9	4,48	4,63
2012	3,98	4,14	4,29	4,36	4,39	4,22	4,07	4,21
Mean / Średnio	4	4,22	4,38	4,34	4,41	4,33	4,21	4,27
		4,3		4,38		4,27		
LSD/NIR (P<0,05) = 0,32								
The yield of straw / Plon słomy (t/ha)								
2010	4,15	4,03	4,37	4,35	4,21	3,98	4,15	4,18
2011	4,76	4,86	5	4,9	5,05	5,36	4,83	4,97
2012	4,88	4,97	5,02	4,93	5,02	4,93	5,07	4,98
Mean / Średnio	4,6	4,62	4,8	4,73	4,76	4,76	4,68	4,71
		4,71		4,74		4,72		
LSD/NIR (P<0,05) = 0,141								
Agronomic use efficiency of sulphur / Wskaźnik efektywności rolniczej siarki (kg grain/kg S - kg ziarna/kg S)								
2010		8,5	7,8	12,5	7	4,5	7,5	8
2011		15,8	12,5	19	13,3	22	9,3	15,3
2012		8	7,8	19	10,3	12	5,8	10,5
Mean / Średnio		10,7	9,4	16,8	10,2	12,8	7,5	11,3
		10,1		13,5		10,2		
LSD/NIR (P<0,05) = 1,55								

ziarna i słomy w porównaniu z kontrolą (S_0), a odpowiednie różnice w zależności od wariantu nawozowego dla ziarna wahały się w granicach od 0,21 t/ha dla obiektu S_6 do 0,41 t/ha dla S_4 . W przypadku słomy odpowiednie różnice wynosiły od 0,02 t/ha (S_1) do 0,2 t/ha (S_2).

Nawożenie siarką zwiększa plon roślin w sposób pośredni, wpływając korzystnie na metabolizm azotu w roślinie. Wielu autorów (Ahmad i in., 1999; Fotyma, 2003) podaje, że szybki rozwój organów wegetatywnych pod wpływem dobrego zaopatrzenia w azot powoduje większe zapotrzebowanie na siarkę siarczanową (VI) do syntezy białek. Według Podleśnej i in. (2013) u roślin nawożonych siarką zachodzi bardziej efektywny transport asymilatów, co pozwala uzyskać wyższe wartości indeksu żniwnego.

Na lepszą redystrybucję azotu z organów wegetatywnych do ziarniaków w roślinach nawożonych tym składnikiem zwracają uwagę również Eriksen i Mortensen (2002), którzy wykazali, że siarka w uprawie jęczmienia jarego znacząco zwiększała wykorzystanie i efektywność azotu z nawozów. Staugaitis i in. (2014), a także Inal i in. (2003) oraz Järvan i in. (2008), plonotwórczy efekt siarki tłumaczą również pozytywnym jej wpływem na elementy struktury plonu, przede wszystkim na większą liczbę i masę ziaren w kłosie roślin nawożonych tym składnikiem. Zdaniem Staugaitis i in. (2014), jej rola w kształtowaniu plonu ziarna polega na regulacji procesów fizjologicznych zachodzących w roślinie na początku fazy strzelania w źdźbło. Z kolei według Potarzyckiego i in. (2015), efektem stosowania nawozów siarkowych jest zwiększanie udziału liści w nadziemnej biomase pszenicy, przy jednoczesnym zmniejszaniu udziału źdźbeł, co wskazuje na ten organ jako źródło asymilatów dla rozwijających się ziarniaków.

W przeprowadzonych badaniach zwiększenie plonów ziarna pod wpływem nawozów zawierających siarkę wynosiło od 5,3% do 10,3% (Tabela 2). Z przeglądu badań nad plonotwórczym działaniem siarki w Niemczech i Wielkiej Brytanii wynika, że przyrost plonu ziarna jęczmienia jarego pod wpływem nawożenia tym składnikiem w dawkach do 30 kg/ha S wynosił w tych

krajach odpowiednio: 11-22% i 5-28% (Zhao i in., 2003). Pozytywny wpływ siarki na plonowanie innych gatunków zbóż wykazali w badaniach również nad pszenicą ozimą: Inal i in. (2003), Wieser i in. (2004), Girma i in. (2005), Järvan i in. (2008), Podleśna (2013), Potarzycki i in. (2015), nad pszenżytem jarym - Klikocka (2004), nad kukurydzą - Lepiarczyk i in. (2013). W literaturze przedmiotu nie brakuje jednak danych, które nie potwierdziły plonotwórczego działania siarki (Świdarska-Ostapiak i Stankowski, 2002; Fotyma, 2003; Kulczycki, 2007). Brak reakcji plonu zbóż na nawożenie siarką w tych badaniach wynikał prawdopodobnie z wystarczającej zasobności gleb, na których je prowadzono, w przyswajalną formę tego składnika.

Nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy plonotwórczym działaniem badanych nawozów, zawierających formę jonową (siarczan amonu i siarczan potasu) i elementarną (Wigor S) (Tabela 2). Siarka w formie elementarnej jest nierozpuszczalna w wodzie, co ogranicza możliwość jej strat w wyniku wymywania w głębi profilu glebowego. Z drugiej strony istnieje konieczność jej transformacji mikrobiologicznej z udziałem bakterii z rodzaju *Thiobacillus* do formy siarczanowej (VI), dostępnej dla roślin. Konieczność biologicznego utleniania sprawia, że siarka w postaci pierwiastkowej działa wolniej niż w formie jonowej (Lucheta i Lambais, 2012). Przebieg i wydajność tego procesu zależy przede wszystkim od aktywności glebowych mikroorganizmów, determinowanej warunkami termiczno-wilgotnościowymi (Scherer, 2009). Wszystkie sezony wegetacyjne, w których prowadzono badania cechowały się na ogół stosunkowo wysokimi opadami i temperaturami, przekraczających średnie wieloletnie (Tabela 1). Potwierdzają to relatywnie wysokie wartości wskaźnika Sielianinova dla okresów wegetacji jęczmienia w poszczególnych latach badań. Takie warunki mogły sprzyjać szybkiemu utlenianiu elementarnej siarki wnoszonej z Wigorem S do $S-SO_4^{2-}$, co prawdopodobnie tłumaczy niewielkie zróżnicowanie plonotwórczej efektywności badanych nawozów w poszczególnych sezonach wegetacyjnych.

Nie stwierdzono istotnych różnic nie tylko pomiędzy

plonotwórczym działaniem badanych nawozów, ale również pomiędzy działaniem dawek 20 i 40 kg S/ha. Zastosowanie wyższych dawek tego składnika nie przyniosło spodziewanych efektów produkcyjnych, ale było zgodne z danymi, według których efektywna dawka siarki dla zbóż, wynosi 15-25 kg/ha (Walker i Dawson, 2003; Zhao i in., 2003). Ten poziom siarki zalecany jest w agrotechnice zbóż w krajach Europy Zachodniej (20-30 kg/ha) i w Ameryce Północnej (17-34 kg/ha) (Morris, 2007). W literaturze przedmiotu można spotkać dla zbóż również inne dane. Järvan i in. (2008) na przykład wykazali bardzo duży przyrost (7,7-43%) plonu ziarna pszenicy ozimej już po aplikacji 10 kg/ha S. Barczak (2010) z kolei dla jęczmienia jarego maksymalny plon uzyskała po zastosowaniu 40 kg/ha S, a Potarzycki (2003) wykazał silną reakcję tego gatunku na stosowanie siarki w formie superfosfatu prostego (12% S), stwierdzając istotny przyrost plonu aż do dawki 50 kg/ha S.

W celu dokonania oceny produkcyjnej skuteczności nawożenia w przeprowadzonych badaniach, obliczono dla poszczególnych obiektów nawozowych wskaźnik efektywności rolniczej siarki, który wyraża przyrost plonu ziarna jęczmienia jarego w kg na 1 kg zastosowanego składnika (Tabela 2). Wskaźnik ten jest miarą zdolności roślin do przetworzenia pobranego składnika na plon użytkowy. Wykazano duże zróżnicowanie wartości omawianego parametru w zależności od roku badań. W 2010 roku, w którym temperatury powietrza w maju i czerwcu oraz opady w maju były znacznie niższe niż w pozostałych objętych badaniami latach, efektywność rolnicza siarki wynosiła średnio tylko 8 kg ziarna/1 kg S. Najwyższe wartości tego wskaźnika uzyskano w 2011 roku (15,3 kg ziarna/kg S), co było prawdopodobnie konsekwencją najkorzystniejszych warunków hydrotermicznych utrzymujących się w fazach wegetacji, w których następuje wykształcanie ziarna – stosunkowo wysokich opadów w maju i czerwcu oraz wysokich temperatur w maju. W każdym z badanych sezonów wegetacyjnych najwyższą efektywność rolniczą siarki uzyskano w wyniku zastosowania siarczanu potasu (średnio – 13,5 kg ziarna/kg S), znacznie niższą – po aplikacji pozostałych badanych nawozów (dla siarczanu

amonu – 10,1, dla Wigoru S – 10,2). Wyższa dawka siarki (40 kg/ha S) powodowała w porównaniu z niższą (20 kg/ha S) obniżenie wartości badanego wskaźnika. Było to konsekwencją faktu, że badane dawki na ogół nie różnicowały istotnie wielkości plonu ziarna. Najmniejsze różnice w efektywności dawek siarki wystąpiły po jej zastosowaniu w formie siarczanu amonu (12,1%). Dla siarczanu potasu i Wigoru S te różnice stanowiły odpowiednio – 39,3% i 41,4%.

Średnia dla trzyletniego cyklu badań zawartość białka w ziarnie jęczmienia jarego, które stanowi najważniejsze kryterium wartości paszowej plonu, wynosiła 110,1 g/kg (Tabela 3). W ziarnie z wszystkich obiektów nawożonych siarką w porównaniu z ziarnem roślin nienawożonych wykazano wyższą zawartość białka, ale istotne przyrosty dotyczyły jedynie obiektów nawożonych nawozami siarczanowymi (S_1 , S_2 , S_4) – odpowiednie różnice wynosiły: 5,6%, 6,4% i 5,2%. Na ogół nie potwierdzono statystycznie różnic pomiędzy wpływem poszczególnych nawozów, ani ich dawek, na kształtowanie zawartości białka w ziarnie. W literaturze przedmiotu brak jednoznacznego rozstrzygnięcia co do optymalnej formy siarki w agrotechnice zbóż, gdyż jej efektywność determinują zróżnicowane warunki siedliskowe prowadzenia badań. Wydaje się, że stosowanie siarki elementarnej, formy w porównaniu z siarczanową(VI) mniej podatnej na wymywanie, powinno być preferowane na glebach lekkich, na których stopniowe uwalnianie jonów z tych nawozów stanowi ich zaletę (Lucheta i Lambais, 2012).

Badania własne prowadzone na piasku gliniastym mocnym nie wykazały wyraźnej przewagi którejkolwiek z badanych form pod względem efektywności plonotwórczej i zawartości białka. Przyczyn tego zjawiska można upatrywać w dużym uwilgotnieniu gleby we wszystkich objętych badaniami sezonach wegetacyjnych. Suma opadów w okresie od kwietnia do sierpnia lat 2010-2013 była wysoka i relatywnie mało zróżnicowana, występowały też stosunkowo wysokie temperatury (Tabela 1). Takie warunki sprzyjały utlenieniu biologicznemu siarki elementarnej do postaci jonowej, co uzasadnia brak różnic w działaniu badanych nawozów.

Table 3. The content and yield of protein in grain of spring barley**Tabela 3.** Zawartość i plon białka w ziarnie jęczmienia jarego

	Control/ Kontrola	Type of fertilizer / Rodzaj nawozu						
		(NH ₄) ₂ SO ₄		K ₂ SO ₄		Wigor S		Mean / Średnio
Years / Lata		Dose of sulphur/Dawka siarki (kg/ha S)						
	0	20	40	20	40	20	40	
	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	
The content of protein / Zawartość białka 6.25*N (g/kg)								
2010	108,1	106,9	107,7	106,4	107,9	107,5	107,5	107,5
2011	106,5	111,8	112,9	111,6	109,3	107,4	110,8	110
2012	104,4	115	118,8	110	118,1	108,1	113,8	112,6
Mean / Średnio	106,3	112,3	113,1	109,3	111,8	107,7	110,7	110,1
		112,7		110,6		109,2		
LSD/NIR (P<0,05) = 4,8								
The yield of protein / Plon białka (kg/ha)								
2010	407,5	421,1	439,4	427,7	437	415,7	437,5	426,8
2011	453,7	510,9	537,4	517,8	523,5	526,3	496,4	509,3
2012	415,5	476,1	509,7	479,6	518,5	456,2	463,2	474
Mean / Średnio	425,6	469,4	495,5	475	493	466,3	466,1	470,1
		482,5		484		466,2		
LSD/NIR (P<0,05) = 25,66								

Plon białka jest wypadkową plonu ziarna i zawartości w nim białka. Najwyższe plony białka uzyskano w latach 2011 i 2012 (Tabela 3), sklasyfikowanych na podstawie współczynników Selianinova, jako optymalne pod względem termiczno-wilgotnościowym. Konsekwencją oddziaływania siarki na wielkość plonu ziarna jęczmienia jarego i zawartości w nim białka, był istotny przyrost plonu białka we wszystkich obiektach doświadczalnych. Najwyższe przyrosty stwierdzono po zastosowaniu 40 kg·ha⁻¹ S w postaci nawozów siarczanowych (S₃ i S₅) - odpowiednie różnice w stosunku do kontroli wynosiły średnio dla trzech lat badań 16,4% i 15,8%. Nieco niższe przyrosty nastąpiły w wyniku aplikacji Wigoru S z elementarną formą siarki (średnio – 9,5%). Dawka 40 kg/

ha S, bez względu na formę nawozu, pozwalała na ogół uzyskać wyższe plony białka niż dawka 20 kg/ha S, ale różnice nie były potwierdzone statystycznie.

PODSUMOWANIE

Nawożenie siarką, niezależnie od formy nawozu zawierającego ten składnik, na ogół istotnie podwyższało w porównaniu z obiektem kontrolnym wielkość plonu ziarna i słomy jęczmienia jarego. Nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy plonotwórczym działaniem badanych nawozów, zawierających formę jonową (siarczan amonu i siarczan potasu) i elementarną (Wigor S). Również badane dawki (20 i 40 kg/ha S) nie różnicowały istotnie wielkości plonu, a zastosowanie wyższych dawek tego składnika

(40 kg/ha S) nie przyniosło spodziewanych efektów produkcyjnych.

Obliczona efektywność rolnicza siarki, która jest miarą wpływu tego składnika na plonowanie jęczmienia jarego, wykazała duże zróżnicowanie wartości w poszczególnych latach badań. W każdym z lat najwyższą efektywność siarki uzyskano w wyniku zastosowania siarczanu potasu, znacznie niższą – po aplikacji pozostałych badanych nawozów. Zastosowanie wyższej dawki siarki (40 kg/ha S) powodowało obniżenie wartości badanego wskaźnika w porównaniu z niższą (20 kg/ha S).

Ziarno jęczmienia jarego w wyniku nawożenia siarką, niezależnie od jej dawki i formy, zawierało więcej białka niż ziarno roślin nienawożonych. Najwyższe zawartości tego składnika uzyskano po aplikacji siarczanu amonu. Konsekwencją oddziaływania siarki na wielkość plonu ziarna jęczmienia jarego i zawartość w nim białka, było zwiększenie jego plonu. Najwyższe przyrosty stwierdzono w wyniku zastosowania 40 kg S/ha w postaci nawozów siarczanowych.

Przeprowadzone badania pozwalają sądzić, że nawożenie siarką w warunkach niedoboru tego składnika w glebie i przy utrzymujących się stosunkowo wysokich opadach, bez względu na zastosowaną formę, ma istotne znaczenie dla możliwości uzyskania wysokiego plonu ziarna i słomy jęczmienia jarego oraz kumulacji w nim białka.

PIŚMIENNICTWO

- Ahmad, A., Abdin, M. Z. (1999) Interactive effect on sulphur and nitrogen on the oil and protein contents and on the fatty acid profiles of oil in the seeds of rapeseed (*Brassica campestris* L.) and mustard (*Brassica juncea* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 185 (1), 49-54. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1439-037X.1998.tb00417.x/epdf>
- Ahmad, G., Jan, A., Arif, M., Jan, M. T., Khattak, R. A. (2007) Influence of nitrogen and sulfur fertilization on quality of canola (*Brassica napus* L.) under rainfed conditions. *Journal of Zhejiang University*, B, 8 (10), 731-737. DOI: <https://dx.doi.org/10.1631/jzus.2007.B0731>
- Barczak, B. (2010) Sulphur as a nutrient determining the yield size and quality of selected crop species. Postdoctoral thesis. Bydgoszcz: UTP. (in Polish)
- Barczak, B., Skinder, Z., Piotrowski, R. (2016) Sulphur as a factor that affects nitrogen effectiveness in spring rapeseed agrotechnics. Part II. Yield of seeds and protein. *Acta Scientiarum Polonorum, Agricultura*, 15 (4), 3-14. Available at: <http://agricultura.acta.utp.edu.pl/index.php/agricultura/article/view/43/20>
- Eriksen, J., Mortensen, J. V. (2002) Effects of timing of sulphur application on yield, S-uptake and quality of barley. *Plant and Soil*, 242, 283-289. Available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023%2FA%3A1016224209654.pdf>
- Filipek-Mazur, B., Lepiarczyk A., Tabak, M. (2013) Effect of nitrogen and sulphur fertilization on yield and chemical composition of maize grain part II. Nitrogen and sulphur content. *Fragmenta Agronomica*, 30 (4), 29-35. Available at: [http://www.up.poznan.pl/pta/pdf/2013/FA%2030\(4\)%202013%20Filipek%20Mazur.pdf](http://www.up.poznan.pl/pta/pdf/2013/FA%2030(4)%202013%20Filipek%20Mazur.pdf) (in Polish)
- Fotyma, E. (2003) The influence of sulphur fertilization on nitrogen use efficiency by arable crops. *Fertilizers and Fertilization*, 4, 117-136.
- Girma, K., Mosali, J., Freeman, K. W., Raun, W. R., Martin, K. L., Thomason, W. E. (2005) Forage and grain yield response to applied sulphur in winter wheat as influenced by source and rate. *Journal of Plant Nutrition*, 28, 1541-1553. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01904160500203259>
- Główny Urząd Statystyczny (2017) Wyniki produkcji roślinnej 2016. Warszawa: Główny Urząd Statystyczny (GUS). (in Polish)
- Inal, A., Günes, A., Alpaslan, M., Adak, M., Taban, S., Eraslan, F. (2003) Diagnosis of sulphur deficiency and effects of sulphur on yield and yield components of wheat grown in central Anatolia Turkey. *Journal of Plant Nutrition*, 26 (7), 1483-1498. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1081/PLN-120021056?journalCode=lpla20>
- Jamal, A., Moon, Y. S., Abdin, M. Z. (2010) Sulphur – a general overview and interaction with nitrogen. *Australian Journal of Crop Science*, 4, 523-529. Available at: http://www.cropj.com/jamal_4_7_2010_523_529.pdf
- Janzen, H. H., Bettany, J. R. (1984) Sulphur nutrition of rapeseed. I. Influence of fertilizer nitrogen and sulphur rates. *Soil Science Society of America Journal*, 48, 100-106
- Järvan, M., Edesi, L., Adamson, A., Lukme, L., Akk, A. (2008) The effect of sulphur fertilization on yield, quality of protein and baking properties of winter wheat. *Agronomy Research*, 6 (2), 459-469. Available at: <http://agronomy.emu.ee/vol062/p6203.pdf>
- Jeschke, M., Diedrick, K. (2012) Sulfur fertility for crop production. Available at: <https://www.pioneer.com/home/site/us/agronomy/sulfur-fertility-crop-production/>
- Klikocka, H. (2004) Wpływ nawożenia siarką na plon i skład chemiczny ziarna pszenżyta jarego oraz właściwości gleby. *Fragmenta Agronomica*, 22 (3), 70-78.
- Klikocka, H., Wyłupek, T., Narolski, B. (2015) Analiza zawartości siarki w biosferze Zamojszczyzny. *Ochrona Środowiska*, 37, 33-42. Available at: file:///C:/Users/Admin/Desktop/Klikocka_1-2015.pdf
- Korbas, M., Mrówczyński, M. (2012) Methodology of integrated protection of spring and winter barley. IOR-PIB, Poznań, 2012, 1-70. (in Polish)
- Kulczycki, G. (2007) Wpływ siarki siarczanowej i elementarnej na plon i skład chemiczny roślin oraz właściwości chemiczne gleby. *Fragmenta Agronomica*, 24 (1), 140-148. Available at: [http://www.up.poznan.pl/pta/pdf/Fragm.%20Agron.%20vol.%2024%20\(2007\)/24\(1\)%202007.pdf](http://www.up.poznan.pl/pta/pdf/Fragm.%20Agron.%20vol.%2024%20(2007)/24(1)%202007.pdf)
- Lepiarczyk, A., Filipek-Mazur, B., Tabak, M., Joniec, A. (2013) Effect of nitrogen and sulphur fertilization on yield and chemical composition of maize grain I. Maize grain crop yield and its components. *Fragmenta Agronomica*, 30 (3), 115-122.
- Li, C., McLinden, C., Fioletto, V., Krotkov, N., Carn, S., Joiner, J., Streets, D., He, H., Ren, X., Li, Z., Dickerson, R. (2017) India is overtaking China as the world's largest emitter of anthropogenic sulfur dioxide. *Scientific Reports*, 7, 14304. DOI: <https://dx.doi.org/10.1038/s41598-017-14639-8>

- Lośak, T., Hrivna, L., Richter, R. (2000) Effect of increasing doses of nitrogen and sulphur on yields, quality and chemical composition of winter rape. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 472, 481-487.
- Lu, Z., Streets, D. G., Zhang, Q., Wang, S., Carmichael, G. R., Cheng, Y. F., Wei, C., Chin, M., Diehl, T., Tan, Q. (2010) Sulfur dioxide emissions in China and sulfur trends in East Asia since 2000. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 6311-6331.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5194/acp-10-6311-2010>
- Lucheta, A. R., Lambais, M. R. (2012) Sulfur in agriculture. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 1369-1379. Available at: <http://www.producao.usp.br/bitstream/handle/BDPI/38530/S0100-06832012000500001.pdf?sequence=1>
- Mathot, M., Mertens, J., Verlinden, G., Lambert, R. (2008) Positive effects of sulphur fertilisation on grasslands yields and quality in Belgium. *European Journal of Agronomy*, 28, 655-658.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2007.12.004>
- Morris, R. J. (2007) Sulphur in agriculture: global overview. *Fertilization Focus*, 1-2, 12-16.
- Podleśna, A. (2013) Studies on role of sulfur at forming of mineral management and height and quality of chosen crops yield. Puławy: IUNG-PIB. Postdoctoral thesis. (in Polish)
- Potarzycki, J. (2003) Rola siarki z superfosfatu prostego w nawożeniu jęczmienia jarego. Cz. I Plon i jakość ziarna. *Fertilizers Fertilization*, 4 (17), 180-192.
- Potarzycki, J., Przygocka-Cyna, K., Wendel, J., Biniek, Ł., Ridiger, B. (2015) The impact of sulphur fertilization on yield of winter wheat. *Fragmenta Agronomica*, 32 (4), 63-72. Available at: [http://www.up.poznan.pl/pta/pdf/2015/FA%2032\(4\)%202015%20Potarzycki.pdf](http://www.up.poznan.pl/pta/pdf/2015/FA%2032(4)%202015%20Potarzycki.pdf)
- Przygocka-Cyna, K., Grzebisz, W. (2017) The sulfur balance in Poland – a regional analysis. *Fragmenta Agronomica*, 34 (1), 60-75. Available at: [http://www.up.poznan.pl/pta/pdf/2017/FA%2034\(1\)%202017%20PrzygockaCyna.pdf](http://www.up.poznan.pl/pta/pdf/2017/FA%2034(1)%202017%20PrzygockaCyna.pdf)
- Raun, W. R., Barreto, H. J. (1992) Maize grain yield response to sulphur fertilization in central America. *Sulphur in Agriculture*, 16, 26-30.
- Scherer, H. W. (2009) Sulphur in soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172, 326-335.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1002/jpln.200900037>
- Siebielec, G., Smreczak, B., Klimkowicz-Pawlas, A., Kowalik, M., Kaczyński, R., Koza, P., Ukalska-Jaruga, A., Łysiak, M., Wójtowicz, U., Poreba, L., Chabros, E. (2017) Monitoring of chemistry of arable soils in Poland in 2015-2017. Puławy: IUNG-PIB. (in Polish) Available at: http://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/pms/monitoring_jakosci_gleb/Raport_MChG_etap3.pdf
- Staugaitisi, G., Brazienė, Z., Marcinkievicius, A., Mazeika, R., Antanaitis, S., Stagaitienė, R. (2014) Spring barley as affected by nitrogen and sulphur fertiliser rates calculated using different diagnostic methods. *Zemdirbyste*, 101 (4), 373-380.
DOI: <https://dx.doi.org/10.13080/z-a.2014.101.047>
- Szulc, W. (2008) The requirements for crop plant fertilization with sulfur and the methods for their determination. Post-doctoral thesis. Warszawa: SGGW.
- Świdarska-Ostapiak, M., Stankowski, S. (2002) Effect of nitrogen and sulfur fertilization on yield and components of bare and husked oat yield. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 484, 711-717.
- Walker, K., Dawson, C. (2003) Sulphur fertiliser recommendations in Europe. *Fertilizers Fertilization*, 3, 16, 71-89.
- Wieser, H., Gutser, R., von Tucher, S. (2004) Influence of sulphur fertilization on quantities and proportions of gluten protein types in wheat flour. *Journal of Cereal Science*, 40, 239-244.
- Zhao, F. J., Mc Grath, S. P., Blake-Kalff, M. M., Link, A., Tucker, M. (2003) Crop responses to sulphur fertilization in Europe. *Fertilizers Fertilization*, 3 (16), 26-51.